

オブザーバーを用いた構造物の 振動制御に関する実験的研究

岡 林 隆 敏* ・ 奥 松 俊 博**
古 江 照 巳***

Experimental Study of Structural Vibration Control using Observers

by

Takatoshi OKABAYASHI*, Toshihiro OKUMATSU**
and Terumi FURUE***

The purpose of this study is to verify the efficiency of active vibration control for a five story building model using by observer. The controller is realized using by the minimum order observer. The structural model is controlled by the active mass damper which is driven by DC servomotor. Experimental test are performed for the five story building model which is controlled using active mass damper subjected to impulse excitations and earthquake ground motions by means of the active vibration control.

1. はじめに

土木・建築構造物の長大化, 超高層化にともない, 地震, 風などの動的な外乱による振動問題の重要性が顕著になってきた。また, 交通振動による都市内高速道路周辺の環境振動が深刻な問題になっている。このような振動の対策として, 近年, 制振技術としてのアクティブ振動制御が理論的に実証され, 実用の段階に入りつつある^{1),2),3)}。

これらの振動制御理論では, 現代制御理論を基礎にしている。現代制御理論⁴⁾により構造物を振動制御するためには, その全状態量をフィードバックする必要がある。このため, 基本的には制御しようとする振動次数と同等個のセンサーを設置しなければならない。しかし, 橋梁, 高層建築物のような長大構造物を制御対象とする場合, 振動状態を検出するためのセンサーと配線の信頼性を考えると, センサーの数は少ないほ

ど望ましい。複数の振動モードを制御することを考えると, 必要とする複数のセンサーのうち一部からの情報が, 何らかの原因で途絶えた場合, その時の構造物の振動状態は制御不可能になる場合が考えられる。

本研究は, 構造物の振動状態を推定するオブザーバー⁵⁾を用いて, 1つのセンサーから複数の振動モードをアクティブ振動制御する方法の可能性を示したものである。オブザーバーは, 制御対象振動次数が複数であるときにそれぞれの振動モードが観測可能である点に設置した数個のセンサーから, それぞれの振動次数の状態量を推定する方法である。前報⁶⁾ではシミュレーションによりオブザーバーの有効性を確認した。本報告はオブザーバーを用いてアクティブ制振実験を行い, その有効性を実証したものである。

平成3年9月30日受理

*社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

**大学院修士課程土木工学専攻 (Graduate Student, Department of Civil Engineering)

***(株)長大 (Chodai, Co., Ltd.)

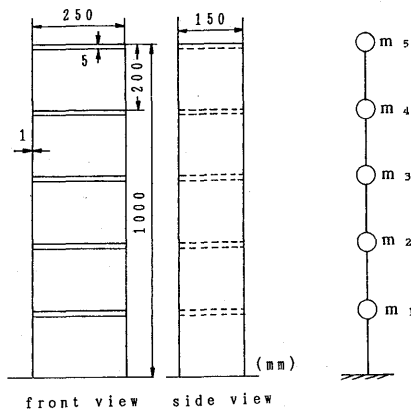
2. 制御対象構造物とそのモデル化

(1) 制御対象のモデル化

本研究では、制振対象構造物として、建築構造物を想定した5層の骨組構造模型を製作した。この模型を図-1 a)に示した。この模型はアルミニウムで製作されており、その弾性定数は $7.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ である。また、構造物模型の全重量は4.305kgfとなっている。

この構造物のモデルは、まず、5層骨組構造物を平面骨組構造と考え、17節点のFEMモデルとした。このモデルの各層の中心に単位の力を加えて各層のたわみ性行列 S を求める。この逆行列より5質点系の剛性マトリックス K を次のように決める。

$$E = S^{-1} \quad (1)$$



a) Building model b) Controlled model

Fig. 1 Building model and five-degree-of freedom system.

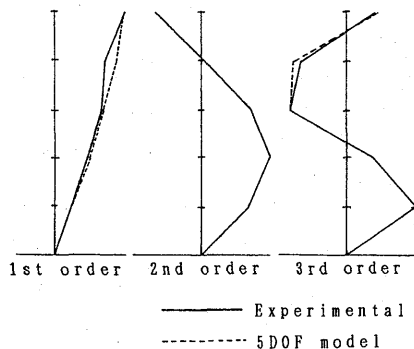


Fig. 2 Vibration modes.

このように5層骨組構造物をさらに単純化して、図-1 b)のような5質点系にモデル化して、これを制御対象モデルとする。

制振対象モデルの固有振動数及び固有モードの解析値と実験結果を図-2、表-1に示した。解析値と実験値は良い一致を示している。

(2) 制御対象とフィードバック系

外力 $f(t)$ を受ける n 質点系の運動方程式は次式のようなになる。

$$M\ddot{y}(t) + C\dot{y}(t) + Ey(t) = f(t) \quad (2)$$

ここに $y(t)$ 、 $f(t)$ は n 次元ベクトル、 M 、 C 、 K は $(n \times n)$ 次元の質量マトリックス、減衰マトリックス、および剛性マトリックスである。また、モードマトリックス Φ を用いると、物理座標 $y(t)$ はモード座標 $q(t)$ を用いて次のようになる。

$$y(t) = \Phi q(t) \quad (3)$$

上式を用いると(2)式は次式で表わせる。

$$\ddot{q}(t) + H\dot{q}(t) + \Omega q(t) = \Phi^T f(t) \quad (4)$$

$$H = \begin{bmatrix} 2h_1\omega_1 & & \\ & \ddots & \\ & & 2h_n\omega_n \end{bmatrix} \quad \Omega = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & \\ & \ddots & \\ & & \omega_n^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここに、 ω_i 、 h_i は各々 i 次の固有円振動数、減衰定数である。次に状態変数

$$X(t) = [q_1(t) \quad \dot{q}_1(t) \quad \dots \quad q_n(t) \quad \dot{q}_n(t)]^T \quad (6)$$

を用いると、(4)式は次のような状態方程式で表わせる。

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BF(t) \quad (7)$$

ここに A は $(2n \times 2n)$ 次元の係数行列、 $F(t)$ は $2n$ 次の外力ベクトルである。

Table 1 Frequencies and damping constants.

Order	Natural Frequency (Hz)			Damping
	FEM	5DOF	Experiment	
1	2.37	2.37	2.39	0.0064
2	7.25	7.17	7.52	0.0050
3	12.0	11.7	12.7	0.0045
4	15.9	15.6		
5	18.5	18.4		

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_n \end{bmatrix}$$

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_i^2 & -2\zeta_i\omega_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$F(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi^T f(t) \end{bmatrix}$$

また、 m 次元の観測量を $Y(t)$ は、 $(m \times n)$ 次元の観測マトリックス C を用いて

$$Y(t) = CX(t) \quad (9)$$

で表すことができる。

時間刻みを Δt として、(7) 式を差分表示する。状態遷移行列に次のようなPade近似を用いると、

$$\exp(A\Delta t) = (I - A\Delta t/2)^{-1}(I + A\Delta t/2) \quad (10)$$

(9) 式は次のような差分式で表される。

$$(I - A\Delta t/2)X_{j+1} = (I + A\Delta t/2)X_j + B(F_{j+1} + F_j)\Delta t/2 \quad (11)$$

ここで、 $X_j = X(j\Delta t)$ 、 $F_j = F(j\Delta t)$ である。

ここで外力項として、地震力 $f(t)$ と、構造物の最上階に単一で作用する制御力 $u(t)$ を考える。この場合、外力項 $f(t)$ は次のようになる。

$$f(t) = b_1 f(t) + b_2 u(t) \quad (12)$$

b_1 、 b_2 は n 次元ベクトルであり、地震力は全質点に、制御力は最上点に作用するものであるから、

$$b_1 = [1 \cdots 1]^T, \quad (13)$$

$$b_2 = [0 \cdots 0]^T$$

となる。これを用いて (7) 式を書き改めると

$$\dot{X}(t) = AX(t) + B_1 f(t) + B_2 u(t) \quad (14)$$

となる。ここに

$$B_k = \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi^T b_k \end{bmatrix} \quad (k = 1, 2) \quad (15)$$

である。

制御力 $u(t)$ は、全状態量 $X(t)$ をフィードバックさせて構成する。

$$u(t) = -KX(t) \quad (16)$$

ここに K はフィードバックゲインマトリックスであり、これは最適レギュレータ理論により得られる。こ

の最適ゲインマトリックスの求め方は前報⁶⁾で示した。

3. アクチュエータの製作とコントローラの設計

(1) アクチュエータ

構造物をアクティブ振動制御するために、質量（アクティブ・ダンパー・マス）を加速度運動させることにより生じる制御力を用いる。アクチュエータは、構造物の振動方向（水平1次元）に設置したレール上をDCサーボモータを兼ねた質量が移動することにより、構造物に制御力を付与する機構となっている。製作したアクチュエータの概形を図-3に、実物を図-4に示した。アクチュエータの設置位置は、制御する各振動次数の振動モードの節とならない位置とし、同時に少ない制御力で制振できるよう、比較的振幅の大きくなる位置を選定する。本研究では、制御する振動次数を1次と2次とした。これはコントローラとしてパーソナルコンピュータを用いているために、この模型ではそれ以上の振動数に追従しないためである。これらの振動モードを考慮してアクチュエータは最上階に設置した。

製作したアクチュエータの動特性を求めるために掃引試験を行なった。その結果を図-5に示した。縦軸は制御力であり、横軸は駆動周波数に表わしている。図

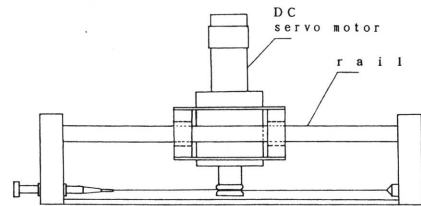


Fig. 3 Schematic diagram of actuator.

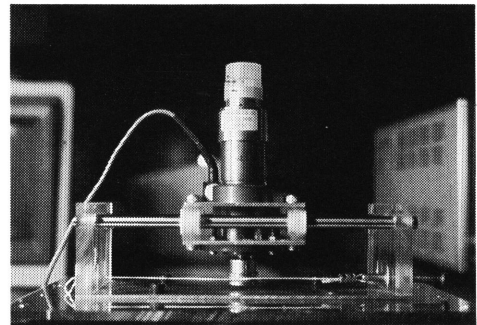


Fig. 4 Actuator.

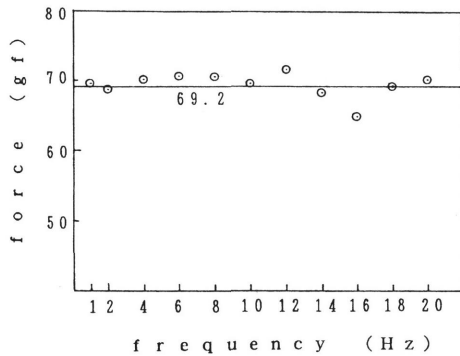


Fig. 5 Characteristic of actuator.

より、1 Hzから20 Hzまでの周波数に対するアクチュエータの動特性は平坦であり、アクチュエータの入力電圧 1 V に対する出力は約 700 gf であることが確認された。

(2) コントローラ部の設計

振動状態にある構造物の出力信号は、構造物の最上階に設置したセンサーからの加速度を積分して得られる変位、および速度と、振動台に設置したセンサーからの加速度である。これらのアナログ信号を A/D 変換し、デジタル信号としてパーソナルコンピュータに入力する。パーソナルコンピュータには、最適レギュレータ理論により求められた最適フィードバックゲインマトリックス K と、Gopinath の方法により求められたオブザーバーの係数マトリックスが予め入力されている。これらのパラメータを用いて、時事刻々の構造物振動の信号から、オブザーバー理論により推定状態量 $\hat{X}(t)$ を計算する。

構造系 (7) (9) 式において、 m 次元の観測量 $Y(t)$ が得られた場合、最小次元オブザーバーは $(n-m)$ 次元の動的システムとして次のように表わされる。

$$\dot{\omega}(t) = \hat{A}\omega(t) + \hat{B}F(t) + GY(t) \quad (17)$$

$$\hat{X}(t) = \hat{C}\omega(t) + \hat{D}Y(t) \quad (18)$$

ここに、 \hat{A} , \hat{B} , G , \hat{C} , \hat{D} はそれぞれ $(2n-m) \times (2n-m)$, $(2n-m) \times 2n$, $(2n-m) \times m$, $(2n \times 2n-m)$, $(2n \times m)$ 次元の係数マトリックスである。また、これらの係数マトリックスを求めるために、極配置法^{4),6)}により設計パラメータを決定する必要がある。本報告ではオブザーバーの極を

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -0.17 \pm 31.13i \\ \lambda_2 &= -0.30 \pm 65.52i \end{aligned} \quad (19)$$

に設定した。

以上の K と $\hat{X}(t)$ を用いて制御力 $u(t)$ を計算する。これを D/A 変換することにより出力信号を得る。

4. 振動制御実験

本研究で実験対象とするアクティブ制振システムを図-6 に示した。また、実験システムが図-7 である。制振システムの構成は次のようになっている。

① [加 振]

振動台で構造物を加振する。

② [検 出]

- 構造物最上階に設置したフィードバック用のセンサーから加速度を検出する。
- 振動台に設置したフィードフォワード用のセンサーから基礎外乱の加速度を検出する。

③ [コントローラ]

以上のフィードバック、フィードフォワードデータを A/D 変換して、パーソナルコンピュータに入力し、

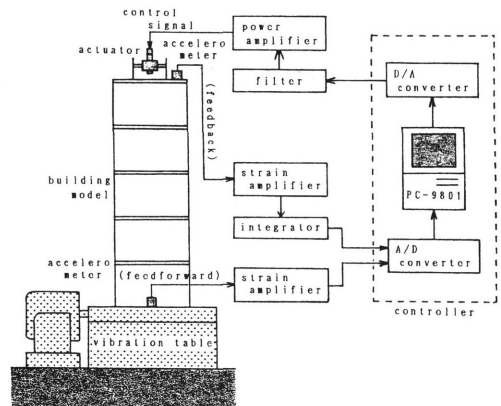


Fig. 6 Block diagram of control system.

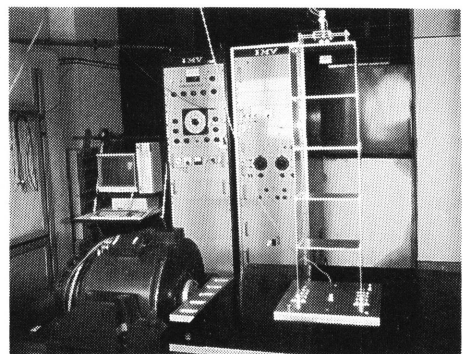


Fig. 7 Structural model and vibration table.

これらのデータを用いて計算された制御力をD/A変換してアナログ量として出力する。

④ [駆動部]

コントローラから出力された制御力信号から、直流成分と高次振動成分をフィルターで除去し、パワーアップでアクチュエータを作動させる。

本研究では、オブザーバーを用いたアクティブ制御の有効性を確認するために以下のような実験を行った。

- ①制御対象となる構造物の各次振動数（1次振動、2次振動）に同調させて構造物を振動させ、その時の制振効果を確認する。
- ②E1 Centro地震波形で構造物を振動させた時の制振効果を確認する。

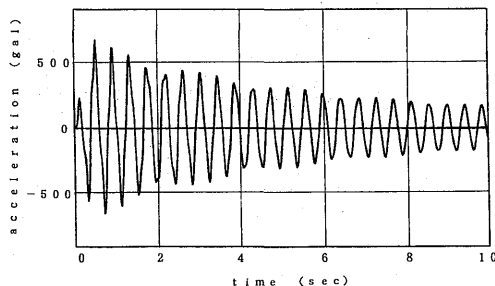
5. 実験結果の考察

まず、衝撃力で振動台を加振して、構造物に1次振動を励起させたときの制振効果を検討する。図-8は、このときの構造物最上階の加速度応答を示したものである。縦軸は加速度を、横軸は時間を表し10秒間観測

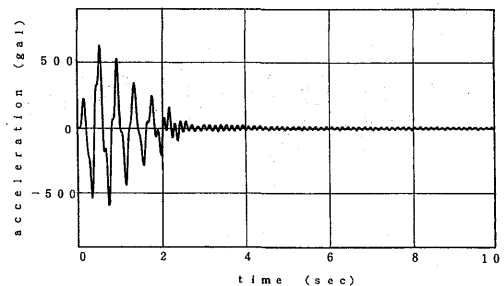
した。

a)は制御のない場合で、b)は制御のある場合である。制御のない場合は、構造物の減衰定数が0.006であるので減衰の少ない波形が表れる。制御をかけることにより、図-8 b)のように減衰が増大し、3秒程度で収束していることが確認できた。次に、2次振動を励起させたときの制振効果を検討する。1次振動と同じく10秒間観測した。これを図-9に示す。a)は制御のない場合であり、b)は制御のある場合である。この実験結果から、制御のない場合の加速度波形の減衰は小さなものであるが、制御をかけることにより減衰が増大し、やはり、3秒程度で収束していることが確認できた。

次にE1 Centro地震N S成分による地震波形で振動台を駆動させたときの、構造物の制振効果について検討する。図-10は、1/100秒刻みのE1 Centro波のデータ16秒間をD/A変換して振動台を加振したときの振動台の加速度波形を示したものである。縦軸は加速度、横軸は時間である。この地震波が構造物に作用したときの、構造物最上階の加速度応答を示したものが図-11

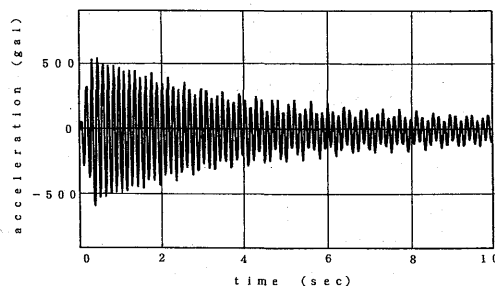


a) without control

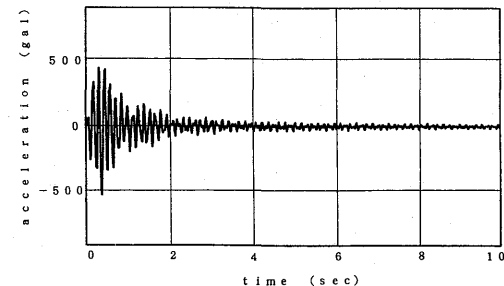


b) with control

Fig. 8 Accelerations for impact excitation; 1st order vibration.



a) without control



b) with control

Fig. 9 Accelerations for impact excitation; 2nd order vibration.

である。a)が制御のない場合であり、b)が制御のある場合である。制御のない場合は、振動発生後、2秒程経過してから波形振幅が程大し、その後同じ程度の振幅で振動していることがわかる。また経過時間10秒位までは1次振動成分と2次振動成分が混在しており、また10秒以降は2次振動が卓越している波形であるこ

とがわかる。

ここで制御を行うと、振動発生後2秒程してから制振効果が表れ、その後も有効な制振効果が認められる。この応答加速度波形は、主に2次振動成分が卓越して存在しているが、その振幅レベルは全体に渡り、60~70%低減していることがわかる。

さらに、図-12はこの一連の地震波が構造物に作用したときの構造物最上階のパワースペクトル密度を示したものである。a)が制御のない場合であり、b)が制御のある場合である。縦軸が出力電圧で表示したときのパワースペクトル密度であり、横軸は振動数である。図の最初のピークは1次振動(2.37Hz)に対するスペクトル、次のピークは2次振動(7.52Hz)に対するスペクトルを表している。制御を行うことによって、1次振動のスペクトルは1/10に低減し、2次振動のスペクトルは1/30に低減していることが確認された。

以上の実験結果により、オブザーバーを用いて1つのアクチュエータで複数の振動モードを制御するアクティブ制振の有効性が確認できた。

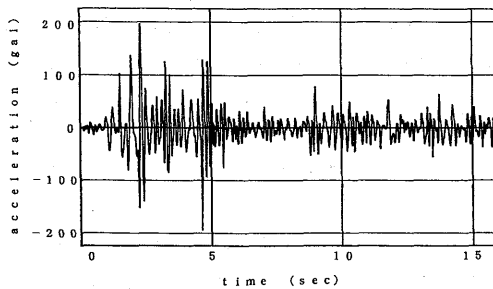
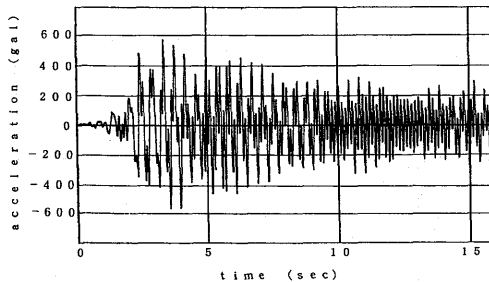
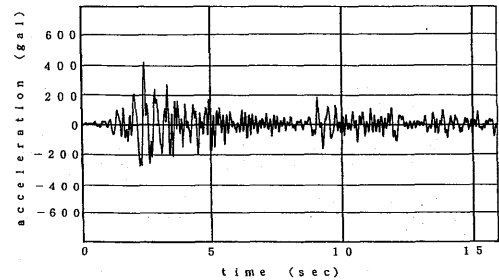


Fig. 10 Ground acceleration

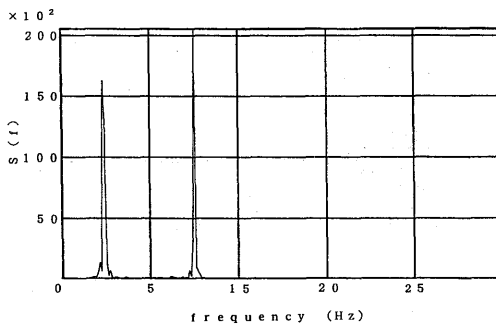


a) without control

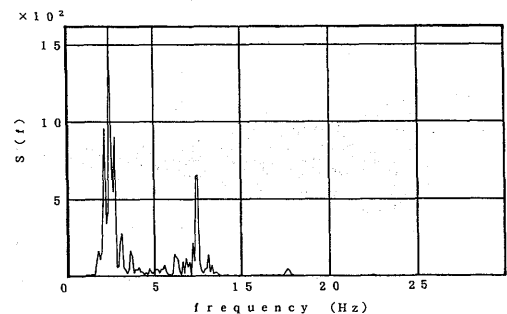


b) with control

Fig. 11 Acceleration responses for earthquake.



a) without control



b) with control

Fig. 12 Power spectrum density of acceleration responses accelerations.

6. おわりに

前報⁹⁾では、オブザーバーを用いた5層骨組構造物のアクティブ振動制御の有効性をシミュレーションにより確認したが、本研究では、このシステムを実現し、1つのアクチュエータにより1次振動と2次振動の複数の振動モードが制御可能であることを実験的に確認した。得られた結果を要約すると以下のようになる。

(1) オブザーバーを用いた多自由度系のアクティブ振動制御のためのコントローラを構成した。

(2) 5層骨組構造物模型とアクチュエータを製作した。また、それぞれの特性試験を行なうことにより、構造物の振動特性、並びに、アクチュエータの周波数特性を把握した。アクチュエータについては制御対象となる構造物の各次振動数の範囲内において、有効な動特性を示すことがわかった。

(3) 以上の制御対象の構造物模型、制御力を与えるアクチュエータ、またコントローラを用いて、オブザーバーを用いたアクティブ振動制御の実験システムを構築することができた。

(4) 構造物に1次振動、2次振動を励起させたときの各次振動の制御による効果を確認した。0.006程の小さい減衰定数を示す対象構造物は制御が施されることによってそれぞれ、急激にかつ確実に振動が制御され、安定化が図られた。

(5) E1 Centro地震N S成分で構造物を加振した場合の制御実験を行なった。このとき、最上階の加速度応答の振幅レベルは60～70%程低減され、また、スペクトルは1次振動成分が1/10に、2次振動成分が1/30に低減された。

以上のように、1個のアクチュエータと加速度計を用いて、オブザーバーの理論を適用することにより、2次振動までを振動制御することが有効であることを確認した。

参考文献

- 1) Yang, J. N. and T. T. Soong: Recent Advance in Active Control of Civil Engineering, Proba. Eng. Mech., Vol. 3, No. 4, pp. 179-188, 1988.
- 2) Yang, J. N. and P. Ghaemmaghami: New Optimal Control Algorithms for Structural Control, Jour. Eng. Mech, ASCE, Vol. 113, No. 9, pp. 1369-1386, 1987.
- 3) Chung, L. L. and T. T. Soong: Experimernnts on Active Control of Seismic Structures, Jour. Eng. Mech, ASCE, Vol. 114, No. 2, pp. 241-255,

1988.

- 4) 白石昌武: 入門現代制御理論, 啓学出版株式会社, 1989.
- 5) 岩井善太, 井上昭, 川路茂保: オブザーバー, コロナ社, 1988.
- 6) 岡林隆敏, 奥松俊博, 古江照巳: オブザーバーを用いた構造物の振動制御, 長崎大学工学部研究報告, 第2巻第37号, pp. 189-194, 1991.